






FORMATION OF INSOLUBLE COATING**Publication number:** JP2000106363 (A)**Publication date:** 2000-04-11**Inventor(s):** BREMMER JEFFREY NICHOLAS; LIU YOUFAN**Applicant(s):** DOW CORNING**Classification:**

- international: *B05D3/02; C08L83/05; C09D1/00; C09D183/00; H01L21/312; H01L21/316; B05D3/02; C08L83/00; C09D1/00; C09D183/00; H01L21/02; (IPC1-7): H01L21/312; C08L83/05; C09D1/00; C09D183/00; H01L21/316*

- European: B05D3/02H; H01L21/312B2B

Application number: JP19990195448 19990709**Priority number(s):** US19980113347 19980710**Also published as:**

 US5906859 (A)
 TW442546 (B)
 SG72968 (A1)
 KR20000011599 (A)
 EP0971400 (A2)

Abstract of JP 2000106363 (A)

PROBLEM TO BE SOLVED: To realize a method for forming an insoluble coating having low permittivity and excellent mechanical characteristics. **SOLUTION:** The method for forming an insoluble coating on a basic material comprises step (A) for forming a soluble hydrogen silsesquioxane resin coating on a basic material by coating it with a coating composition containing hydrogen silsesquioxane resin, step (B) for heating the hydrogen silsesquioxane resin coating at 325 to 350 deg.C for 15 min to 1 hour, and step (C) for heating the coating at 400 to 450 deg.C in an inert environment for a time sufficient for producing an insoluble ceramic-like coating having standardized SiH bonding ensity of 50 to 80%.

Data supplied from the **esp@cenet** database — Worldwide

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2000-106363
(P2000-106363A)

(43) 公開日 平成12年4月11日 (2000.4.11)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコード* (参考)
H 0 1 L 21/312		H 0 1 L 21/312	C
C 0 8 L 83/05		C 0 8 L 83/05	
C 0 9 D 1/00		C 0 9 D 1/00	
183/00		183/00	
H 0 1 L 21/316		H 0 1 L 21/316	G
審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 6 頁)			

(21) 出願番号 特願平11-195448

(22) 出願日 平成11年7月9日 (1999.7.9)

(31) 優先権主張番号 09/113347

(32) 優先日 平成10年7月10日 (1998.7.10)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 590001418

ダウ・コーニング・コーポレーション
DOW CORNING CORPORA
TION
アメリカ合衆国ミシガン州ミッドランド
(番地なし)

(72) 発明者 ジェフリー ニコラス プレマー
アメリカ合衆国, ミシガン 48640, ミッ
ドランド, スタージョン クリーク パー
クウェイ 5709

(74) 代理人 100077517

弁理士 石田 敬 (外4名)

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 不溶性コーティングの形成方法

(57) 【要約】

【課題】 低い誘電率及び優れた機械的特性を有する不溶性コーティングを形成する方法を提供すること。

【解決手段】 (A) ハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂を含むコーティング組成物で基材をコーティングして基材上に可溶性ハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂コーティングを形成すること; (B) まず、前記ハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂コーティングを325℃～350℃の温度で15分間～1時間の時間加熱すること; (C) その後、50～80%の規格化されたSiH結合密度を有する不溶性セラミック状コーティングが生成するのに十分な時間不活性環境中で400℃～450℃の温度で前記コーティングを加熱すること; を含む基材上に不溶性コーティングを形成する方法。

【特許請求の範囲】

【請求項1】 (A) ハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂を含むコーティング組成物で基材をコーティングして基材上に可溶性ハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂コーティングを形成すること；

(B) まず、前記ハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂コーティングを325℃～350℃の温度で15分間～1時間加熱すること；

(C) その後、50～80%の規格化されたSiH結合密度を有する不溶性セラミック状コーティングが生じるのに十分な時間不活性環境中で400℃～450℃の温度で前記コーティングを加熱すること；を含む基材上に不溶性コーティングを形成する方法。

【請求項2】 前記コーティング組成物がさらに溶剤を含み、その溶剤を蒸発させて基材上にハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂コーティングを形成する請求項1記載の方法。

【請求項3】 前記ハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂が式： $\text{HSi}(\text{OH})_x(\text{OR})_y\text{O}_{z/2}$ （式中、各Rは独立に、酸素原子を介してケイ素に結合している場合には加水分解可能な置換基を形成している有機基又は置換有機基であり、xは0～2、yは0～2、zは1～3、 $x+y+z$ は3である）により表される単位を有する樹脂である請求項1記載の方法。

【請求項4】 前記ハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂が式： $(\text{HSiO}_{3/2})_n$ （式中、nは少なくとも8の値である）により表される樹脂である請求項1記載の方法。

【請求項5】 基材がスピニングによりコーティングされる請求項1記載の方法。

【請求項6】 前記コーティング組成物がそのコーティング組成物の重量を基準にして20～99.9重量%の溶剤を含む請求項2記載の方法。

【請求項7】 溶剤が、アルコール、芳香族炭化水素、アルカン、ケトン、エステル、グリコールエーテル及びジメチルポリシロキサンからなる群から選ばれる請求項2記載の方法。

【請求項8】 基材が電子基板である請求項1記載の方法。

【請求項9】 工程(C)での加熱が、50～70%の規格化されたSiH結合密度及び2.7～2.9の誘電率を有する不溶性セラミック状コーティングが生じるのに十分な時間不活性環境中で425℃～450℃の温度で行われる請求項1記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、ハイドロジェンシルセスキオキサン樹脂(H樹脂)から低誘電性コーティングを製造する方法に関する。この方法は、H樹脂のコーティングを基材上に適用し、続いて、前記コーティン

グをまず325℃～350℃の温度で15分間～1時間加熱し、その後に、規格化されたSiH結合密度が50～80%になるまで400℃～450℃の温度で加熱することにより前記コーティングを硬化させることを含む。この硬化プロセスによって、驚くべきことに、低い誘電率及び優れた機械的特性を有する膜が製造される。

【0002】

【従来の技術】電子基板上にセラミック又はセラミック状コーティングを製造するためにH樹脂を使用することは当該技術分野で周知である。H樹脂を硬化させてそれらのコーティングを製造するための方法が多数開発されてきた。周知の熱加工及び硬化条件(すなわち、3つのシリアルホットプレートの各々で1分間保持し、続いて窒素雰囲気で満たされた炉内で1時間保持する)では、2.9～3.0の誘電率が通常達成される。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】2.9～3.0の誘電率を有するコーティングは0.25ミクロン以上の電子デバイスに適する。しかしながら、より小さな(すなわち0.13～0.18ミクロンの)デバイス構造物に対してはかなり低い誘電率(Dk)を有するコーティングが必要である。H樹脂を硬化させて、コーティングの形態にあるより低い誘電率を有するものを製造する方法が幾つか提案されている。しかしながら、それらの方法は往々にして、低Dkコーティングを製造するのに困難で費用のかかる加工を必要とする。例えば、米国特許第5,441,765号明細書には、H樹脂からのコーティングの製造方法であって、硬化したコーティングのDkが2.8～4.5方法が開示されている。その明細書に開示されている特許発明に係る方法は、H樹脂をデバイス上に適用し、そのコーティングされたデバイスをSi-O含有セラミックコーティングが生成するのに十分な時間加熱し、その後、Si-O含有セラミックコーティングを水素ガスを含むアニーリング雰囲気に暴露することを含む。

【0004】米国特許第5,547,703号明細書にも、低Dkコーティングの製造方法が教示されている。その方法は、H樹脂を電子基板上に適用すること；アンモニア及び湿気中で加熱すること；その後、無水アンモニア中で加熱すること；最後に酸素中で加熱してコーティングをアニールすることを含む。前記方法により製造されるコーティングのDkは2.42～4.92の間であると報告されている。

【0005】

【課題を解決するための手段】我々は、意外にも、H樹脂の熱加工によって、誘電率が2.7～2.9のコーティングが生じることを見いだした。この熱加工は、325℃～350℃の温度でまず加熱し、その後に、規格化されたSiH結合密度が50～80%になるまで400℃～450℃の温度で加熱することによりH樹脂を硬化

させることを含む。

【0006】本発明の目的は、H樹脂を硬化させて誘電率が2.7～2.9であるコーティングを製造する方法を提供することである。

【0007】本発明は、H樹脂から誘電率が2.7～2.9である不溶性セラミック状コーティングを製造する方法に関する。この方法は、H樹脂を基材上に適用し、基材上の前記H樹脂をまず325℃～350℃の温度で15分間～1時間加熱し、規格化されたSiH結合密度が50～80%になるまで400℃～450℃の温度でさらに加熱することを含む。結果として得られるコーティングは、2.9以下、好ましくは2.7～2.9の誘電率を有する。コーティングは、半導体デバイス上の中間層絶縁コーティングとして有用である。

【0008】

【発明の実施の形態】本発明において有用なH樹脂には、式： $\text{HSi}(\text{OH})_x(\text{OR})_y\text{O}_{z/2}$ （式中、各Rは独立に、酸素を解してケイ素に結合している場合には加水分解可能な置換基を形成している有機基又は置換有機基であり、xは0～2、yは0～2、zは1～3、x+y+zは3である）により表される単位を含むヒドリドロキシサン樹脂が包含される。Rの例には、メチル、エチル、プロピル、ブチル等のようなアルキル；フェニルのようなアリール；並びにアリル又はビニルのようなアルケニルが包含される。これらの樹脂は実質的に完全に縮合した $(\text{HSiO}_{3/2})_n$ （式中、nは8以上の値である）であっても、ほんの一部加水分解したもの（すなわち、幾つかのSi-OHを含むもの）及び／又は部分的に縮合したもの（すなわち、幾つかのSi-OHを含むもの）であってよい。

【0009】樹脂の構造に特に制限はない。H樹脂の構造は、概して、はしご型として知られているもの、かご型として知られているもの、又はこれらの混合物であってもよい。樹脂はヒドロキシル基、トリオルガノシロキシ基、ジオルガノハイドロジェンシロキシ基、トリアルコキシ基、ジアルコキシ基等のような末端基を含んでよい。その構造式により表されるわけではないが、樹脂は、0又は2個の水素原子が結合している少数（例えば、10%未満）のケイ素原子及び／又は少数のSiC基、例えば $\text{CH}_3\text{SiO}_{3/2}$ 又は $\text{HCH}_3\text{SiO}_{2/2}$ を含んでもよい。

【0010】上記H樹脂及びそれらの製造方法は当該技術分野で周知である。例えば、米国特許第3,615,272号明細書には、ベンゼンスルホン酸水和物加水分解媒体中でトリクロロシランを加水分解し、次に、得られた樹脂を水又は硫酸水溶液で洗浄することを含む方法による実質的に完全に縮合したH樹脂（100～300ppmまでのシラノールを含むもの）の製造が教示されている。同様に、米国特許第5,010,159号明細書には、アリールスルホン酸水和物加水分解媒体中でヒ

ドリドシランを加水分解して樹脂を形成し、次のその樹脂を中和剤に接触させることを含む方法が教示されている。

【0011】他のヒドリドロキシサン樹脂、例えば、米国特許第4,999,397号明細書に記載されているようなもの；米国特許第5,210,160号明細書に記載されているようなもの、アルコキシシラン又はアシルオキシシランを酸性アルコール系加水分解媒体中で加水分解することにより生成するもの；特開昭59-178749号公報、特開昭60-86017号公報；及び特開昭63-107122号公報に記載されているようなもの；又は他の等価なヒドリドロキシサンも本発明において同様に作用する。

【0012】本発明の好ましい態様において、上記H樹脂の特定の分子量画分を本発明の方法に使用することもできる。そのような画分及びそれらの調製方法は米国特許第5,063,267号及び第5,416,190号明細書に教示されている。好ましい画分はポリマー化学種の少なくとも75%が1200を超える分子量を有するものからなり、より好ましい画分はポリマー化学種の少なくとも75%が1200～100,000の間の数平均分子量を有するものからなる。

【0013】H樹脂は、コーティングの団結性に悪影響を及ぼすこともコーティングの誘電率を増加させることもない限り、他の成分を含んでもよい。周知の添加剤には、米国特許第4,822,697号明細書に記載されているようなH触媒の硬化速度及び／又は硬化度を増加させる白金、ロジウム又は銅触媒のような触媒が包含される。

【0014】前記H樹脂と組み合わせてセラミック酸化物前駆体を使用してもよい。本発明において有用なセラミック酸化物前駆体には、溶液に溶解され、加水分解され、その後比較的低温で熱分解してセラミック酸化物を形成することができる、アルミニウム、チタン、ジルコニウム、タンタル、ニオブ及び／又はバナジウムのような種々の金属の化合物並びにホウ素若しくはリンの化合物のような種々の非金属化合物が包含される。本発明において有用なセラミック酸化物前駆体は米国特許第4,808,653号、第5,008,320号及び第5,290,394号明細書に記載されている。

【0015】H樹脂は典型的には溶剤分散体として基材に適用される。使用することができる溶剤には、H樹脂を溶解し、結果として得られるコーティングに影響を及ぼさずに均質液体混合物を形成する任意の物質又はそれらの混合物が包含される。これらの溶剤には、エチルアルコール又はイソプロピルアルコールのようなアルコール；ベンゼン又はトルエンのような芳香族炭化水素；n-ヘプタン、ドデカン又はノナンのようなアルカン；メチルイソブチルケトンのようなケトン；エステル；グリコールエーテル；又は線状ジメチルポリシロキシサン（例

えば、ヘキサメチルジシロキサン、オクタメチルジシロキサン及びこれらの混合物）及び環状ジメチルポリシロキサンが包含される。溶剤は、適用に望ましい濃度にH樹脂を溶解させるのに十分な量で存在する。典型的には、溶剤は、H樹脂と溶剤の合計量を基準にして20～99.9重量%、好ましくは70～95重量%の量で存在する。

【0016】H樹脂を基材に適用するための特定の方法には、限定するわけではないが、スピンコーティング、浸漬コーティング、スプレーコーティング、フローコーティング、スクリーン印刷等が包含される。好ましい適用方法はスピンコーティングである。溶剤が使用される場合には、コーティングされた基材から溶剤を蒸発させて基材上にH樹脂膜を付着させる。周囲環境への暴露による単純な自然乾燥、真空の適用又は穏やかな加熱（＜50℃）、又は硬化プロセスの初期段階中の蒸発のような任意の適切な蒸発手段を用いることができる。スピンコーティングが用いられる場合には、回転によって溶剤が除去されるため、追加の乾燥方法は最低限に抑えられる。

【0017】基材への適用に続き、H樹脂膜を、まず325℃～350℃の温度で加熱し、その後400℃～450℃の温度で加熱することにより硬化させ、規格化されたSiH結合密度が50～80%、好ましくは50～70%である不溶性セラミック状コーティングにする。「規格化されたSiH結合密度」とは、任意の溶剤の除去後ではあるが加熱して硬化させる前の基材上の未だ硬化していないH樹脂膜中のSiHを基準にした不溶性セラミック状コーティング中のSiHの量を意味する。「不溶性セラミック状コーティング」とは、基材上にH樹脂を付着させる際に使用する溶剤又はH樹脂の適用に有用なものであるとして先に述べた通りの任意の溶剤に実質的に可溶性でないコーティングを意味する。不溶性セラミック状コーティングは、アモルファスシリカ（SiO₂）物質、並びに炭素、シラノール（SiOH）及び/又は水素を完全に含まないわけではないアモルファスシリカ物質を含む。

【0018】H樹脂は、まず、硬化環境を安定化させるのに十分で且つその環境を不活性なものにするのに十分な時間、325℃～350℃の温度で加熱される。400～450℃温度までのランピングの間及び400～450℃の温度での加熱の間に10ppmを超えるレベルの酸素が存在すると、酸化及び不溶性セラミック状コーティング中の極性基の形成が起こり、その結果として高い誘電率がもたらされる。樹脂の若干の網状構造化がこの最初の加熱相の間にかかるが、望ましい誘電率及び機械的特性を備えた不溶性セラミック状コーティングを製造するには不十分である。好ましくは、ハイドロジェンシルセスキオキサンコーティングは15分間～1時間、325℃～350℃の温度で加熱される。必要な時間

は、H樹脂膜を加熱することに用いられる手段に依存するであろう。

【0019】325℃～350℃の温度で加熱後、温度を400℃～450℃、好ましくは425℃～450℃までランピングする。H樹脂は、SiH結合密度が50～80%である不溶性セラミック状膜が生じるのに十分な時間、典型的には15分間～1時間その温度に保たれる。不溶性セラミック状コーティング中のSiHの量が多いと、不適切な機械的特性を有する膜が生じる。熱対流炉、急速熱加工、ホットプレート又は輻射の使用のような任意の加熱方法を本発明において使用することができる。熱対流炉の使用が好ましい。

【0020】H樹脂でコーティングされた基材が325℃～350℃で加熱される環境は、窒素、アルゴン、ヘリウムのような任意の環境、又は空気、過酸化物及びオゾンのような酸素を含む環境のような環境であることができる。しかしながら、不活性環境は、400℃～450℃までのランピング前に確立されねばならない。「不活性環境」とは、10ppm未満の酸素を含む環境を意味する。

【0021】不溶性セラミック状コーティング中のSiHのより少ない量は、典型的にはデバイスにおけるコーティングの高い機械的特性及び高い団結性に関係がある。しかしながら、SiHを望ましい範囲に減少させるのに必要な条件（すなわち、高い加熱温度）は、コーティングの誘電特性を強める。本発明の方法の2段階加熱によって、高い機械的特性と低い誘電率の両方が得られる。本発明に方法により製造される不溶性コーティングは2.9以下、好ましくは2.7～2.9のDkを有する。

【0022】上記方法によって、基材上に薄い（2.5μm未満の）不溶性セラミック状コーティングが製造される。好ましくは、コーティングは0.5～1.2μmの厚さを有する。このコーティングは、種々の基材の不整表面を滑らかにするものであって、密着性に優れる。

【0023】本発明の方法により製造される不溶性セラミック状コーティングは電子基板に特に有用である。

「電子基板」とは、フォーカルプレーンアレイ、光電子デバイス（opto-electronic device）、光起電力セル、オプティカルデバイス、トランジスタ様デバイス、3Dデバイス、絶縁体上シリコン型デバイス（silicon-on-insulator devices）及び超格子デバイス（super lattice device）を包含する半導体部品の生産に使用することを意図したシリコン系デバイス及びガリウムヒ素系デバイスを包含する。

【0024】電子基板はむきだしであっても（すなわち、パッシベーションなし）、1次パッシベーションを有していても、むきだしであっても1層以上のライナー層で被覆されていてもよい1層以上の金属被覆層を含んでいても良い。そのような1次パッシベーション及びラ

イナーは、シリカ、窒化ケイ素、炭化ケイ素、オキシ窒化ケイ素、オキシ炭化ケイ素、 $P_2O_5-SiO_2$ 系ガラス (PSG)、 $B_2O_3-P_2O_5-SiO_2$ 系ガラス (BPSG) 等のようなセラミックコーティングであることができる。1 次パッシベーション及びライナー並びにそれらの作製方法は当該技術分野で周知である。本発明により製造されるコーティングは、任意の金属被覆の適用前にウェハーに適用されてよい。コーティングは中間絶縁層として金属被覆上に適用されるか又は最上層のパッシベーションコーティングとして適用され、デバイスの形成が完了する。

【0025】所望であれば、不溶性コーティング上に追加のコーティングを適用してよい。追加のコーティングには、例えば、アモルファス SiC:H、ダイヤモンド、窒化ケイ素の堆積 (すなわち、CVD、PECVD 等) により形成される Si_2O コーティング、ケイ素含有コーティング、ケイ素と炭素を含有するコーティング、ケイ素と窒素を含有するコーティング、ケイ素と炭素を含有するコーティング及び/又はダイヤモンド様コーティングが包含される。そのようなコーティングの適用方法は当該技術分野で周知である。

【0026】追加のコーティングの適用方法は厳密ではなく、そのようなコーティングは典型的には、熱化学気相成長 (thermal chemical vapor deposition; TCVD)、光化学気相成長、プラズマ促進型化学気相成長 (plasma enhanced chemical vapor deposition; PECVD)、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 及びジェット気相成長 (jet vapor deposition) のような化学気相成長技術により適用される。スパッタリング又は電子ビーム蒸発のような物理的気相成長技術によっても追加のコーティングを適用できる。これらの方法は、熱又はプラズマの形態にあるエネルギーを気化した化学種に加えて望ましい反応を引き起こすか又は材料の固体試料にエネルギーを集中させて材料の堆積を引き起こすことを伴う。

【0027】本明細書に教示した本発明を当業者が理解し、本発明の価値を十分に認めることができるように以下の実施例を示す。

【0028】

【実施例】金属-絶縁体-半導体 (MIS) コンデンサーに対して誘電率測定を実施することによって転化されたコーティングの誘電率を求めた。MIS コンデンサーは、不溶性コーティングの薄膜でコーティングされた低抵抗率 ($\rho \leq 0.025 \Omega \text{cm}$) シリコンウェハー上に約 $0.15 \mu\text{m}$ のアルミニウム電極を堆積させることにより形成した。シャドウマスクを使用して直径が 3~1

0mm のアルミニウム電極ドットを形成した。Hewlett-Packard (登録商標) 4194A インピーダンスアナライザーを使用して $0.1 \sim 1000 \text{kHz}$ の周波数範囲にわたって同じ直径の電極ドット間のインピーダンス測定を行った。インピーダンスデータを直列 RLC モデルにフィッティングさせることにより等価な並列キャパシタンス及び誘電率を計算した。インピーダンスを表面ドット電極間で特性化したため、誘電率の算出に 2 倍の誘電体厚を用いた。

【0029】硬化後の残留 SiH 含有量 (%) を FTIR により求めた。この FTIR 法では、Nicolet (登録商標) 55XB フーリエ変換赤外分光分析計を使用した。透過サンプリング操作モードを用いた。コーティング組成物によるウェハーのスピンのコーティングの前に、剥き出しのシリコンウェハーに対してバックグラウンドスペクトルを集めた。不溶性膜を有するウェハーのスペクトルからバックグラウンドを差し引いて不溶性膜のみのスペクトルを得た。波数 2260cm^{-1} に位置するピークは、転化された膜中の SiH 結合密度を示すものである。膜厚当たりのスパンピーク面積に対する膜厚当たりのこのピーク面積の比を定量化し、規格化された SiH 結合密度を求めた。

例 1

米国特許第 3,615,272 号明細書の記載に従って調製された H 樹脂 ($HSiO_{3/2}$)_n を 22 重量% の濃度でメチルイソブチルケトン中に含むコーティング組成物を SEMIX (登録商標) 6132U スピンコーターにより 2 枚の試料ウェハーに約 5000\AA の硬化前厚さにコーティングし、続いて 150°C 、 200°C 及び 350°C でそれぞれ 1 分間、3 つの窒素パージされた開口式ホットプレートにより逐次ベーキングを行った。次にウェハーを石英環状炉内で窒素雰囲気中で 350°C に加熱した。ウェハーを 350°C に 30 分間保ち、次に窒素雰囲気中で 450°C にさらに加熱した。ウェハーを 450°C に 30 分間保ち、次に窒素中で室温に冷却した。第 1 のウェハーの Dk は 2.81 であった。第 2 のウェハーの Dk は 2.83 であった。第 3 のウェハーの規格化された SiH 含有量は 58% であった。

【0030】例 2

例 1 に記載した手順を用いて試料ウェハーを H 樹脂でコーティングした。ウェハーを 350°C に加熱し、表 1 に記載の環境中で 30 分間そのままにしておいた。次に温度を硬化温度までランピングし、さらに 30 分間その温度のままにしておいた。結果及び加工条件を表 1 に示す。

【0031】

【表 1】

表 1

実験 No.	硬化 温度 (℃)	硬化 環境	実際の O ₂ (ppm)	硬化前 の厚さ (Å)	硬化後 の厚さ (Å)	RI	% SiH	Dk
1	400	Ar	7	5000	4970	1.372	76	
2	400	Ar	7	4930	4970	1.371		2.75
3	400	N ₂	50	4970	4820	1.381	58	
4	400	N ₂	50	4920	4740	1.389		3.16
5	400	N ₂	3	4970	4940	1.375	76	
6	400	N ₂	3	4920	4940	1.374		2.81
7	425	Ar	1.6	5000	4920	1.374	71	
8	425	Ar	1.6	4900	4900	1.375		2.75
9	425	N ₂	3	5010	4920	1.374	69	
10	425	N ₂	3	4900	4890	1.375		2.72
11	425	N ₂	52	4990	4710	1.383	43	
12	425	N ₂	52	4910	4660	1.384		3.47
13	450	Ar	0.3	5010	4760	1.388	59	
14	450	Ar	0.3	4900	4740	1.386		2.88
15	450	N ₂	53	5010	4610	1.388	35	
16	450	N ₂	53	4880	4540	1.391		3.56
17	450	N ₂	4	4990	4780	1.382	58	
18	450	N ₂	4	4910	4750	1.383		2.94
19	475	Ar	1	5130	4690	1.400	48	
20	475	Ar	1	5020	4590	1.410		2.96
21	475	N ₂	5	5020	4810	1.409	44	
22	475	N ₂	5	5030	4580	1.409		3.12
23	475	N ₂	54	5110	4620	1.390	29	
24	475	N ₂	54	5010	4550	1.399		3.65
25	500	Ar	1	5100	4560	1.407	39	
26	500	Ar	1	4970	4470	1.410		3.20
27	500	N ₂	5	5100	4450	1.417	37	
28	500	N ₂	5	5020	4490	1.407		3.20
29	500	N ₂	55	5110	4480	1.408	25	
30	500	N ₂	55	5040	4440	1.412		3.58

Å = 0.1

フロントページの続き

(72) 発明者 ヨウファン リウ

アメリカ合衆国, ミシガン 48640, ミッ

ドランド, サマーセット ドライブ 6000